

南極・昭和基地における超高性能地震計による広帯域高感度 地震観測—第 33 次観測隊報告 1992—

金尾政紀¹・神沼克伊²

Broad-band and Wide Dynamic-range Seismic Observations with a Streckeisen Seismometer (STS) at Syowa Station, East Antarctica —JARE-33 Status Report (1992)—

Masaki KANAO¹ and Katsutada KAMINUMA²

Abstract: A three component Streckeisen Seismometer (STS) was tested during wintering of the 30th Japanese Antarctic Research Expedition (JARE-30, from April 1989) at Syowa Station (69°S, 39°E), East Antarctica. The broad-band and wide dynamic-range digital seismic recording was started from May 1990 by JARE-31. During the wintering season of JARE-33 (from February 1992 to January 1993), both installation conditions and data-acquisition system were improved as follows:

- 1) BRB (Broad-Band) velocity output was monitored by thermal pen-recorders and the digital recording system.
- 2) Digital recording system of LP (Long-Period) acceleration output was started.
- 3) UT (Universal Time) system was replaced by GPS (Global Positioning System) satellites instead of NNSS (Navy Navigation Satellite System).
- 4) Relation between the drift of the pendulum and temperature change was investigated by monitoring POS (Position) output.
- 5) Comparison of two vertical sensors under different installation conditions revealed the nature of characteristic noises.

In this paper, the results of JARE-33 observations are presented. Some problems concerning maintenance of the observation system remain unsolved.

要旨: 南極・昭和基地においては、第 30 次日本南極地域観測隊 (JARE-30) により 1989 年に STS (Streckeisen Seismometer) による地震観測システムが設置され、広帯域高感度広ダイナミックレンジ地震観測が開始された。JARE-31, 32 には観測上の問題点をふまえてシステムに改良が加えられた。JARE-33 では、前年度までの観測方式を継続すると共に STS を定常観測へ移行するための準備として以下の項目を実施した。

- 1) BRB (Broad-Band) のアナログ、及びデジタル収録を継続した。
- 2) LP (Long-Period) のデジタル収録を開始した。
- 3) NNSS (Navy Navigation Satellite System) に代わる、GPS (Global Positioning System) 受信機による刻時信号の取り込みを新たに試みた。
- 4) 温度変化に対する POS (Position) のドリフトを、アナログモニターにより考察した。
- 5) 設置状況を工夫し上下動 2 台の平行観測によりノイズ発生の原因を追求した。

¹ 京都大学防災研究所附属地震予知研究センター。Research Center for Earthquake Prediction, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji 611.

² 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, 9-10, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173.

本稿では JARE-33 での STS 観測システムによる観測報告として、得られた波形を簡単に紹介すると共に観測上の種々の問題点についても言及する。

1. はじめに

南極・昭和基地における超高性能地震計 (Streckeisen Seismometer, 以下 STS と略記する) による三成分地震観測は、第 30 次日本南極地域観測隊 (JARE-30) により 1989 年 4 月に開始された (村上・神沼, 1990)。

昭和基地における STS 地震観測の主な目的は、広帯域かつ高感度、広ダイナミックレンジを持つセンサーの特性を生かして、収録システムを工夫することによりローカルな地震から巨大地震、さらには地球潮汐までをカバーする良質なデジタルデータを取得し、特にグローバル地震学における重要なデータを提供することである。昭和基地は、日本を中心に推進されているグローバル地震観測網 (POSEIDON 計画) の一観測拠点としての役割も担っている。南極大陸には、地震観測点がほかの北半球の大陸に比べてはるかに少なく、しかも現在 STS が設置されているのはフランスのデュモン・デュルビル (Dumont d'Urville) 基地、イタリアのテラノバ・ベイ (Terra Nova Bay) 基地、および昭和基地の計 3 点のみである (図 1)。なお、南極点基地にも STS の設置が計画されている (神沼, 1992)。従って、昭和基地で良質なデジタル記録を得ることは、震源過程や地球内部構造の解明のうえで大変重要な意味を持つといえる。さらに、JARE-34 では超伝導重力計による観測が開始される予定であり (佐藤ら, 1992)、地球潮汐や地球自由振動の周波数領域での比較観測や解析を行うことが期待される。

昭和基地では従来より定常業務として STS 以外にも地震観測が行われている。短周期地震

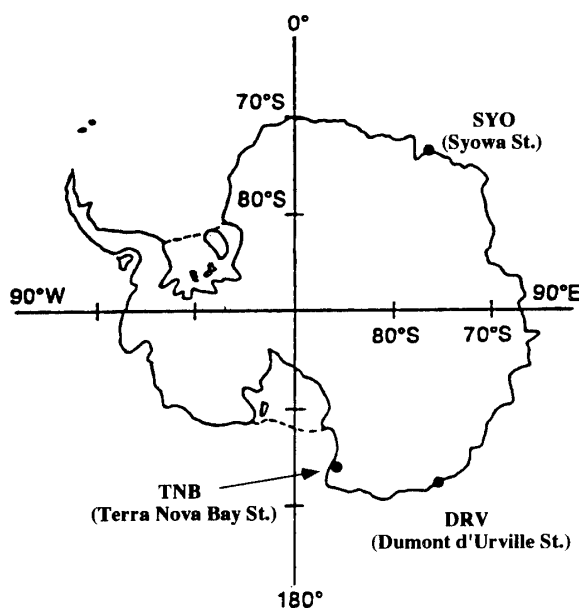


図 1 南極の STS 地震観測点

Fig. 1. Locations of stations in Antarctica where a three-component STS-1 seismometers are installed.

計 (HES; 萩原式電磁地震計, 固有周期 1 秒) 三成分による観測が JARE-7 (1966 年) で定常化された。長周期地震計も PRESS-EWING (固有周期 15 秒) 三成分が JARE-8 (1967 年) で設置され (神沼ら, 1968), さらに JARE-21 (1980 年) で PELS (固有周期 12~15 秒) 三成分に更新された。これらの地震計の信号を記録する方法としては, 当初は感光フィルムやドラムペン記録紙により行われていたが, JARE-21 (1980 年) 以降は地震自動観測システムが導入され, イベント・トリガー方式によるデジタル磁気記録と長時間連続アナログ磁気記録が開始された (渋谷, 1986)。

しかし, これらのシステムは設置されて以来 10 年以上が経過し, 老朽化と故障が目立つようになった。そのため, JARE-33 では地震自動観測システムとイベント・トリガー及びアナログ方式の磁気記録を越冬観測途中で中止した。現在では長時間連続ペンモニター記録のみ稼働しているに過ぎないので, STS による地震観測システムを確立して従来の定常観測に移行することが必要である。このことは, STS による広帯域高感度地震観測のもう一つの目的といえる。

JARE-31 では, JARE-30 で生じた観測上の問題点を考慮して改良を加えると共に, Broad-Band (BRB) の定常的なデジタル連続収録が行われ, デジタル波形記録の日本への送信テストも実施されている (長坂ら, 1991)。JARE-32 では, さらに Long-Period (LP) と Position (POS) のアナログ記録の定常的なモニタリングが開始された (山本, 1992)。

JARE-33 では前年度までの観測方式を継続すると共に, 定常観測へ移行するためのさまざまなシステム拡充と考察を行った。また, 観測上の問題となっていた上下動センサーに特有のノイズの原因追求も行った。具体的な項目は以下のとおりである。

- 1) BRB のアナログ, 及びデジタル収録を改良した。
- 2) LP のアナログ記録を継続すると共に, デジタル収録を開始した。
- 3) 新たに GPS 受信機による刻時信号の取り込みを試みた。
- 4) 温度変化に対する POS のドリフトを考察した。
- 5) 設置状況を工夫し上下動 2 台の平行観測によりシフトノイズ発生の原因を追求した。

以下では, JARE-33 の観測期間における STS による広帯域高感度地震観測の報告を, センサー設置状況と各収録システムについて述べた後, 観測結果としての波形例の紹介と低温下での温度変化に伴う種々の問題について考察し, さらに定常観測に移行する上での問題点について提言を行う。

2. STS の特性

STS は WIELANDT らにより開発されたフィードバック型の地震計で, 従来のものよりも広い周波数帯域 (0.1 秒から周期無限大まで) で観測できる (WIELANDT and STRECKEISEN, 1982)。水平動 (STS-1H) は水平振子型で機械的には従来のものと大差はないが, 上下動

(STS-1V) は機械的な固有周期を無限大にするために leaf-spring とよばれる特有の板バネを使用している。そして、フィードバック回路によりみかけの固有周期が 20 秒に決められている。また、安定した長周期出力を得るためにセンサーケースの外側に電気、及び磁気のシールドをかぶせ、さらにガラス容器で密閉し減圧して、気圧変化の影響を減少するよう工夫がなされている。センサーの設置状況と JARE-33 で新たに改良、工夫した箇所については 3 章で詳しく述べる。

得られる信号出力としては BRB と LP とがある。BRB は 20 秒と 360 秒の二つのモードを選択することができ、それぞれ 0.1~20 秒（または 0.1~360 秒）において平坦な振幅特性を持つ速度出力が得られる (STRECKEISEN and MESSGERAETE, 1987)。また LP は周期 20 秒以上において地動の加速度に比例した出力が得られる。そして BRB, LP とともに 10^7 倍の広いダイナミックレンジを持つ。ブームのゼロ位置は POS 出力によりモニターが可能で、ブームがドリフトした場合のゼロ点への微調整をブームセンターリングモーター・MOT (Moter) 端子に 12V 電圧を供給することで行う。

感度については、上下動・水平動地震計ともに公称 2400 Vs/m であるが、昭和基地で使用した 4 台についてのメーカーの検定結果を表 1 に示す。表左欄より地震計のタイプ、登録番号、BRB と LP 両出力の振幅がフラットな領域での感度、フィードバック回路を含めたみかけ上の固有周期、及び本稿で使用した記号である。また、JARE-33 で新たに設置した上下動 (Serial No. 28737; UD (2)) については、1991 年 9 月に京都大学防災研究所にて振動台による感度検定を行った。50 Hz~50 秒において正弦波振動入力に対する BRB の振幅応答を、20 秒と 360 秒の両モードについて調べた。感度の計算方法は、振動台に取り付けた変位センサーによる記録を速度に換算した入力に対する、BRB の電圧出力の比により求めた。その検定結果を図 2 に示す。0.1~10 秒の周波数範囲ではフラットな振幅特性で、かつその感度は 2400 Vs/m の規定値に近い。しかし、10 秒より長周期側では 20 秒、360 秒の両モードともに長周期になるにつれて感度の上昇が見られる。この原因としては、地震計本体よりもむしろ振動台の変位量測定自体に問題があると考えられる。振動台の変位センサーが長周期側では変位

表 1 昭和基地で使用した STS の検定結果

Table 1. Calibration results of STS-1 seismometers used at Syowa Station (after G. STRECKEISEN & Co.).

Type	Serial number	Sensitivity		Apparent free period (s)	Notation
		BRB (Vs/m)	LP (V/Gal)		
Vertical	28709	2×1081	2×36.4	20.24	UD (1)
Vertical	28737	2×1194	2×40.5	20.16	UD (2)
Horizontal	18739	2×1232	2×41.5	20.13	EW
Horizontal	18740	2×1225	2×41.2	20.12	NS

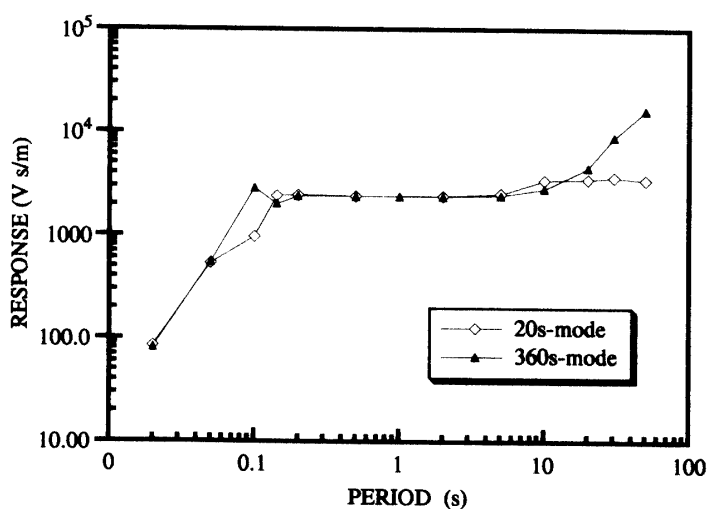


図 2 BRB 出力の振幅特性の振動台による検定結果 (STS-1V, Serial Number 28737).

Fig. 2. Amplitude response of velocity output (BRB) of STS-1V seismometer (Serial Number 28737, UD (2)) calibrated by inputting the displacement oscillation. Open squares show the result from the 20s-mode and solid triangles show that of the 360s-mode, respectively.

量を線形に記録していないことと、検定を行った実験室に混入する長周期ノイズがじょう乱を引き起こしたと推定している。従って 10 秒までの結果から判断すると、UD (2) の感度はマニュアルの公称通りといえる。ほかの 3 台の地震計については国内で感度検定を行っていないため、マニュアルの公称値を信頼して以下の議論を行うことにする。

3. センサーの設置状況

JARE-33 で新たに比較観測用に持ち込んだ STS 上下動 (UD (2)) は、JARE-30 で既設の STS 三成分と HES, PELS の三成分と共に地震計室内に設置した。図 3 には昭和基地における地震観測関係の諸施設の配置を示したが、地震計室は生活に伴う人工ノイズを避けるために基地主要部の南方約 500m に位置している。この地震計室は傾斜地を L 字状に削り取った岩盤（花崗岩質片麻岩）上に建てられ、その後に埋め戻すという半地下構造のため、海水起源の脈動やブリザードなどの強風による地動ノイズも少なく地震観測に良好な環境である。しかしながら、現在では老朽化に伴う種々の問題が生じている（6.4 章に詳述）。地震計室内には、基盤岩に直付けされたコンクリート基台があり、現在では STS を含めて 3 種類の地震計が設置されている。

図 4 には、地震計室内の各地震計センサー部とアンプ類の配置を示す。既設の STS 三成分のセンサー部は、各フィードバックアンプ部や PELS 三成分と共に南側の長周期地震計室内基台に設置されている。前室には、STS 三成分の電源と中継ボックスが置かれている。また、短周期室には HES 三成分が中央の基台に設置されており、HES と PELS のプリアンプもこ

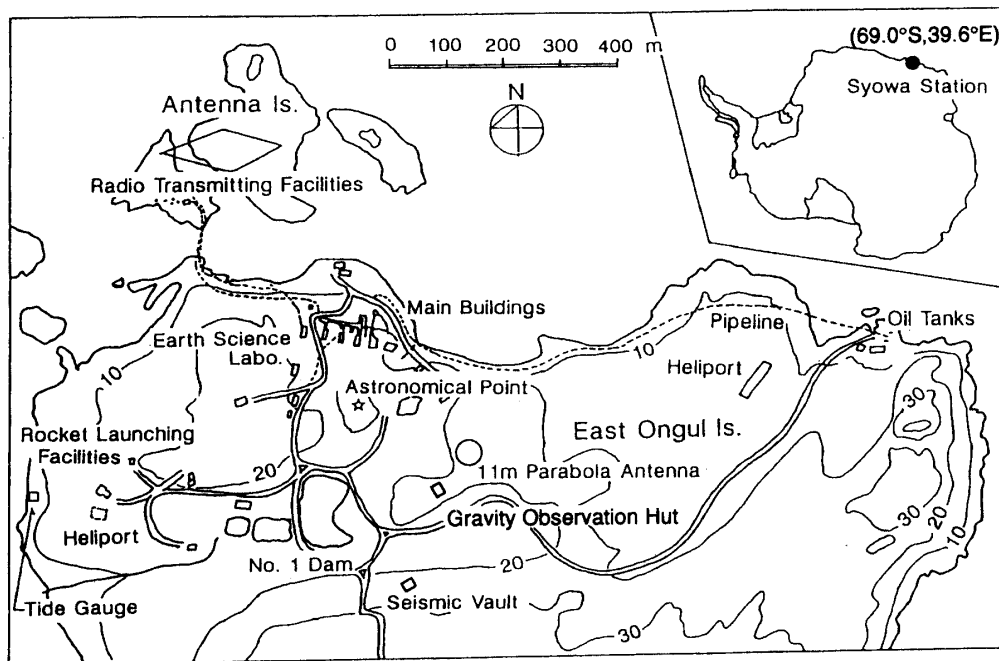


図 3 昭和基地の地震観測関係の諸施設

Fig. 3. Map showing the locations of constructions concerning seismological or geophysical observations at Syowa Station.

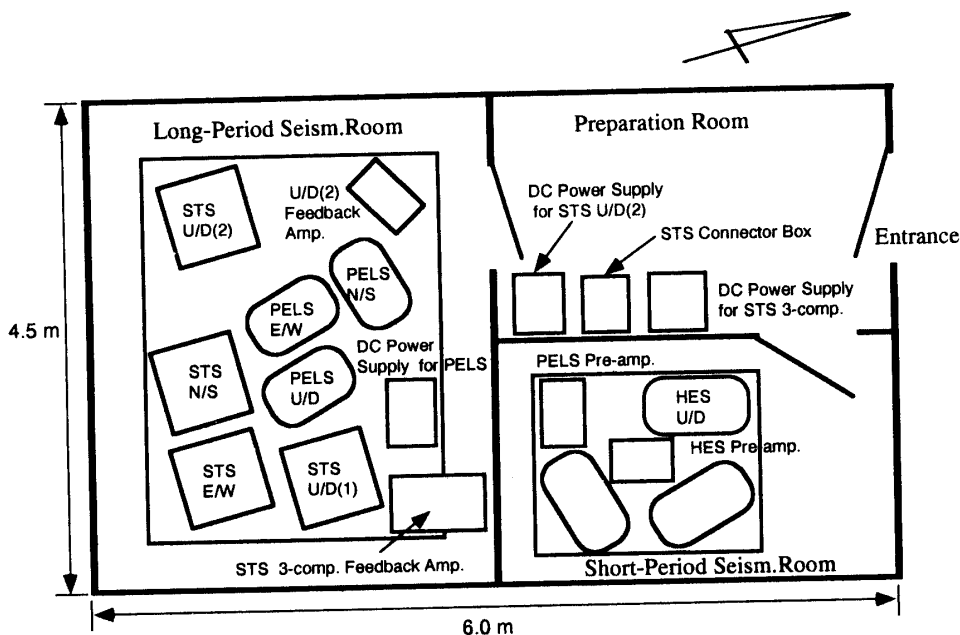


図 4 地震計室内センサー配置図

Fig. 4. Locations of three types of seismometers (HES, PELS, STS) in the seismograph room at Syowa Station.

ここに置かれている。

JARE-32 での観測終了時には、UD (1) は 20 秒モードでガラスベルシャー内は真空状態、水平動 2 台は 360 秒モードで真空状態で観測を行っていた。UD (1) のみ 20 秒モードで観

測を行っていた理由は、360 秒モードの場合に周期 300 秒程度の自由振動を呈する発振現象が現れるためである。この現象については、JARE-31, -32 で共に確認されており、上下動の比較観測によるノイズの原因説明（5.3 章）で詳しく扱う。

以下では、JARE-33 で持ち込んだ上下動 (UD (2)) の設置について述べる。2 月下旬より地震計室の北側に位置する重力計室（図 3）にて調整を行い、3 月上旬に長周期地震計室の基台に 20 秒モードで観測を開始した。図 4 に示したように、コンクリート基台の南東の隅の UD (1) と対角線の位置に、UD (1) と直行する方角となるように UD (2) を据え付けた。フィードバックアンプ部はセンサー部の隣に置き、15 V 電源と中継用端子盤（手製）を前室の STS 三成分用中継ボックスの脇に設置した。また、UD (1) と同様に温度との相関を調べるために、アナログ出力をもつ温度センサーを UD (2) の保温箱内に取り付け常時モニターした。ガラスベルシャー内は、既設 3 台と同様に大気圧比 10% 以下の真空状態（10 cmHg 程度）で観測を行った。

BRB, MOT 及び温度のアナログ信号は、ほかの地震計で使用している 20 チャンネル用アナログケーブルの空きチャンネルを利用した。また、LP と POS については別途に 3 チャンネル（6 芯）のアナログケーブルを利用した。地震計室で得られる各信号は、短周期室および前室にある端子盤を通じて、上記の信号ケーブルを経て約 600 m 離れた地学棟（図 3）に送られる。また、POS のドリフト補正のためのゼロ点調整は、MOT 端子に専用の電源装置を接続して地学棟から遠隔操作により随時行えるようにした。なお、11 月下旬の除雪の際に上記の 3 チャンネル信号ケーブルがブルドーザーにより切断されるという事故が起こったが、早急に 20 チャンネル信号ケーブルの空きチャンネルに繋ぎ替えて事なきを得た。

既設 3 台のガラスプレートは、その周囲に油粘土を盛りコンクリート基台に固定されている（長坂ら，1991）。これらと比較するため、UD (2) 用のガラスプレートは粘土固定をせずにモルタルによる固定方法を試みた。粘土で固定する場合、真空引きを行った際にプレートがたわむことも予想されるからである。実際、プレートを手などで圧力を加えるとブームが変動することが確認された。テラノバ・ベイ基地でも今回の設置方法と同様にモルタルによる固定を行っている（MELONI *et al.*, 1991）。デュモン・デュルビル基地の場合はプレートの下に砂を敷いている（ROULAND, 私信, 1991）が、この基地では夏期間においても気温が 0°C 以上にならず砂中の水分が凍結しプレートがずれるという心配がないためである。固定方法の手順は、気象庁地震観測所の IRIS 用 STS の設置（黒磯，1990）に従った。接着を良くするため基台の表面を削った後、ガラスプレートより一回り大きい木枠にモルタルを流し込み、レベルで水平を取りながらガラスプレートを埋め込んだ。モルタル固定した結果は、地震観測上の顕著な違いは現れなかったが、地震計室内での作業時に粘土固定したプレート上のセンサーにだけノイズが発生するなどの影響を与えた（5.4 章で記述）。

保温方法については、既設 3 台と同様に断熱材（アルミコーティングをした発砲スチロー

ル製)で2重の保温箱を作成し、内部をサーモスタット付きラバーヒーターにより保温(+15°C~+20°Cに設定)した。フィードバックアンプ部も同じ断熱材で保温箱を作成し、ラバーヒーターにより保温した(+15°Cに設定)。年間を通じて長周期室温温度の変化が-13°C~+1°Cであったのに対し、センサー部保温箱内が-4°C~+7°C、フィードバックアンプ部が+15°C~+18°Cであった。センサー部の保温状態はフィードバックアンプ部のそれに比べて断熱効率が悪いが、ガラスプレートがコンクリート基台に接触しており、かつその面積が大きいことが大きな原因と考えられる。なお、保温箱内温度とPOSとの相関については、5.3章で詳しく述べる。

上記の観測状態(上下動2台は20秒モードで真空状態、水平動2台は360秒モードで真空状態)で、3月から10月上旬までは連続観測を行った。10月中旬以降12月までは、上下動2台のセンサー部とフィードバックアンプ部、ガラスプレートの組み合わせを色々と替えることにより、UD(1)に発生していたノイズの原因を追求した。その結果、最終的には問題点の多かったUD(1)を持ち帰り、代わりにUD(2)を水平動2台とともにJARE-34以降の観測に使用することにした(5.4章で記述)。1月中旬にJARE-34との引き継ぎを兼ねて再度センサー部の調整と真空引きを行い、最終的には三成分共に360秒モードに設置しJARE-33の観測を終了した。

4. システム構成と収録状況

地震計室より送られてくるSTS各種シグナルの収録はすべて地学棟で行った。JARE-31, 32におけるシステム構成は、長坂ら(1991)と山本(1992)に詳しい。JARE-33では以下の7つの項目について実施したが、前年度からの観測を引き継いで行うとともに、特に5), 6), 7)については新規に開始した。

- 1) 長時間ペンレコーダーによるモニター記録の継続
- 2) BRB デジタル収録の継続
- 3) BRB デジタルデータの編集
- 4) POS, 温度のモニター記録の継続
- 5) LP のデジタル収録の開始
- 6) 上下動比較観測用の収録システムの設置
- 7) GPS による刻時信号取り込み

JARE-33のシステム構成を表2に示す。また、収録システムのブロックダイアグラムを図5に示す。この図は、標準時計としてGPS(JLR-6000)の刻時信号の取り込みを行っている場合である(4.7章を参照)。

表 2 STS 収録システムのハード構成

Table 2. List of data-acquisition elements of the STS recording system at Syowa Station.

機器名	規格, 性能	数量	製造業者	基地	新規
BRB 収録					
STS 上下動	STS-1V	1	G. Streckeisen	○	
STS 水平動	STS-1H	2	G. Streckeisen	○	
AD 変換器	Q52K-1, 24 bit	3	QUANTERRA	○	
AD 部シグナル コンディショナー	ST-CCU3-/VBB 20 Hz サンプル	1	QUANTERRA	○	
AD 部刻時装置	CRSX1, 精度 1 ms	1	QUANTERRA	○	
センサー用電源	ERS-15-1RO	1	TDA	○	
AD 変換器用電源	DCDC-24-5/15	1	QUANTERRA	○	
アナログモニター	8D23-H, 3 ch	1	NEC 三栄	○	
収録, 編集用パソコン	PC-9801VX41	2	NEC	○	
ハードディスク	PC-98H54L, 40 Mb	2	NEC	○	
MT ユニット	PC-98B51	2	NEC	○	
ローパスフィルター	3201(HPF), 3101(LPF)	3	JEIC		○
上下動テスト観測					
STS 上下動	STS-1V	1	G. Streckeisen		○
ローパスフィルター	3201(HPF), 3101(LPF)	1	JEIC		○
センサー用電源	521C	2	METERONLX		○
アナログモニター	8D23-H, 3 ch	1	NEC 三栄		○
収録用パソコン	PC-9801NS	1	NEC		○
AD 変換ボード	ADM 1698BPC	1	マイクロサイエンス		○
ハードディスク	PC-HD040RB, 40 Mb	1	NEC		○
拡張ユニット	PC-9801N-08	1	NEC		○
LP 収録					
アナログモニター	RD2212, 12 ch	1	NEC 三栄	○	
収録用パソコン	PC-9801UV	1	NEC		○
ハードディスク	DS-80, 80 Mb	1	TEAC		○
デジタルマルチメータ	R6871E-DC	1	ADVANTEST		○
スキャナ	R7210	1	ADVANTEST		○
アナログモニター	3506, 2 ch	1	YOKOGAWA		○
刻時信号取り込み					
GPS 受信機	JLR-6000	1	日本無線		○
GPS 用電源	PAC35-3	1	菊水電子工業		○
タイムコードジェネレーター	T-2200A	1	エイクラ通信		○
パルスジェネレーター	手製	1			○

4.1. 長時間ペンレコーダーによるモニター記録

感熱式 3ch 長時間ペンレコーダー (NEC 三栄 8D23H) により, BRB 出力三成分の連続モニター記録を年間を通して 2mm/s の紙送り速度で得た. HES 三成分用 (SP 記録) と PELS 三成分用 (LP 記録) と共に定常観測の験震のために使用した. STS 用 8D23H には, システム拡充に伴う配線変更が原因と思われる高周波ノイズが, 特に 3 月と 6 月に多く発生してい

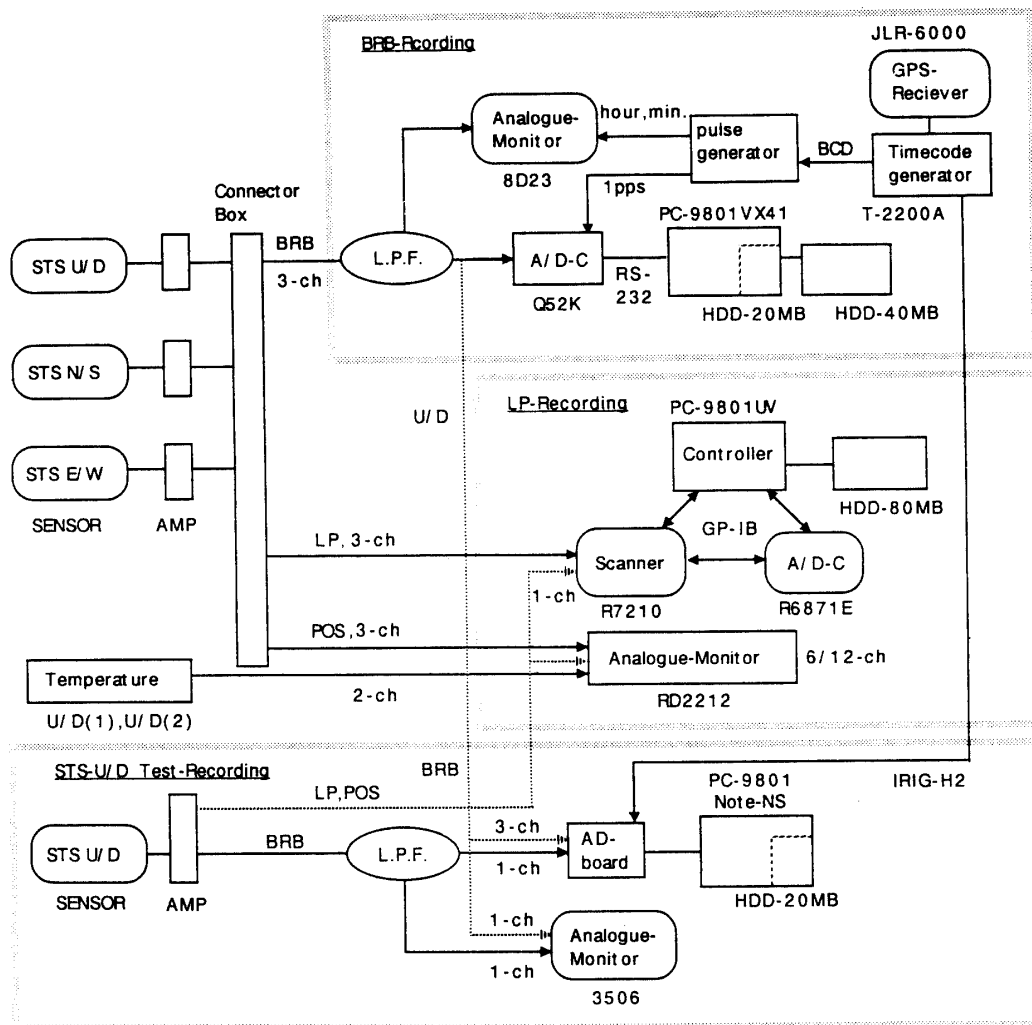


図 5 STS 観測システムのブロックダイアグラム

Fig. 5. Block diagram of STS recording system at Syowa Station. Upper figure: BRB-recording system; Middle figure: LP-recording system; Lower figure: STS-UD test-recording system.

たが、アースの取り方を工夫したことで7月以降は発生回数がかなり減少した。

JARE-33 では8D23H をさらに1台持ち込み、STS 上下動テスト用として3月上旬より12月下旬までモニターした。この入力用シグナルとしては、AD 変換器 (QUANTERRA Q52K-1, CRSX1) へ入力する直前の STS 上下動2台の BRB 用ローパス・フィルターの出力と PELS 上下動の出力とを用い、これら3台の長周期地震計上下動の比較用モニターとして活用した。この上下動テスト用の8D23H には、当初記録紙上にビットが現れる症状が発生していたが、7月下旬にコントロール基板を交換して以降は順調であった。8月中旬以降は従来 SP 記録で使用していた8D23H と交換して使用した。この理由は、SP 用には験震のためペン状態の良好なものを選んだためである。12月下旬までテスト観測用8D23H をモニターし比較観測を終了した (6.2 章に関連)。

4.2. BRB デジタル収録

BRB の前年度までのデジタル収録方式は以下のとおりである。すなわち、三成分の BRB アナログ出力は専用の AD 変換器 (QUANTERRA Q52K-1, CRSX1) により 20 Hz でサンプリングされる。これを収録ソフト上で 10 Hz でリサンプルし、収録用パソコン (NEC PC-9801VX41) のハードディスク (内蔵ハード容量 20 メガバイト, 外付けハード容量 40 メガバイト) に蓄える (図 5 の上枠)。データ量は三成分で 1 日 15 メガバイトに及ぶため、2 日に一度の割合でカートリッジ MT にデータを転送する作業が必要となる。カートリッジ MT は 1 巻が 20 メガバイト容量なので、1 日分のデータが 1 巻に相当する。現システムではデータ転送時に約 20 分間連続収録が中断されることが欠点である。また、もう 1 台のパソコン (NEC PC-9801VX41) にて地震イベントの編集作業を行っている (4.3 章に記述)。

JARE-33 で実施した若干のシステム変更は以下のとおりである。20 Hz から収録ソフト上で 10 Hz にリサンプルする際に、特に 5 Hz 付近にエイリアス効果が生じる。このため 2 月にアンチエイリアス用のローパスフィルターを AD 変換器の直前に取り付けた。図 6 にこのフィルターの周波数特性を示す。5 Hz 以上の成分を除去するためにカットオフ周波数を 2.80 Hz に設定した。AD 変換器は 24 ビットの分解能を保障するが、フィルターのダイナミックレンジはやや低い。さらに、データ転送ソフトをフロッピー起動からハードディスク起動に改良した。これによりデータ転送時の欠測時間が 10% 程度短縮された。

JARE-33 で発生した問題点としては、ハードディスクからカートリッジ MT に転送する際に時々 MT 側にエラーが発生した。その都度 MT を交換するなどして対処したが、この原因としてカートリッジ MT 側の何らかの書き込みエラーと考えられた。また、停電時にはデータファイルが消去されることが 2, 3 回発生した。これは収録ソフトに問題があると考えられる。さらに、7 月下旬には収録用パソコンの画面モニター (NEC PC-TV451N) が故障した。これは地学棟地震観測室で使用していた加湿器に含まれる塩分が、パソコンの高圧部へ

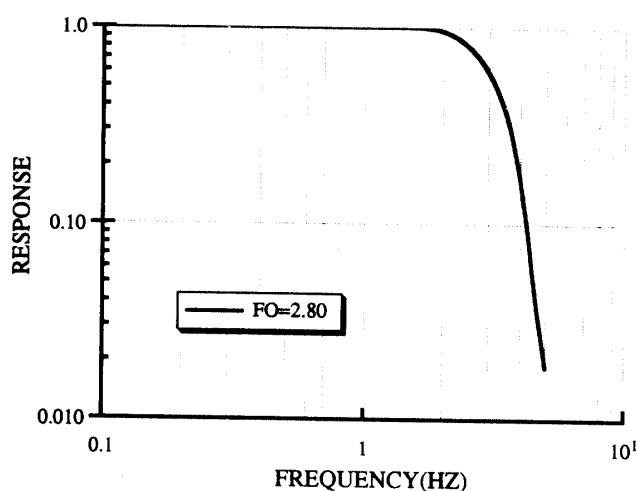


図 6 BRB 収録アンチエイリアス用ローパスフィルターの特性

Fig. 6. Amplitude response of low-pass analog-filter for anti-aliasing velocity output (BRB) of STS-1 seismometers. The cut-off frequency was 2.80 Hz.

付着したことが原因と考えられる。

4.3. BRB デジタルデータの編集

BRB デジタルデータの編集作業も基本的には前次隊と同様である。

- ①収録用パソコンよりカートリッジ MT に転送された 10 Hz サンプリングのオリジナルデータを、編集用パソコン (NEC PC-9801VX41) のハードディスク (内蔵ハード容量 20 メガバイト, 外付けハード容量 40 メガバイト) に再度転送する。
- ②地震あるいは氷震のイベント部分を抜き出し, 10 Hz サンプリングの部分ファイル (イベントファイル) を作成しフロッピーディスクに保存した。
- ③1 枚のフロッピー (1.2 メガバイト) に収納出来ない長時間 (継続時間が 7000 秒以上) のイベントについては, 1 Hz 変換後のイベントファイルを作成しフロッピーディスクに保存すると共に, そのイベントを含む日のオリジナルカートリッジ MT を持ち帰った。
- ④10 Hz オリジナルデータすべてを 1 Hz に変換し, 12 日分の 1 Hz 変換ファイルを再度別のカートリッジ MT 1 巻に保存した。
- ⑤編集作業を終えた 10 Hz オリジナルデータは消去され, そのカートリッジは次の転送用として再利用した。

編集作業はおおむね順調に経過し, 最終的に収録保存したカートリッジ MT は計 112 巻 (10 Hz オリジナルデータ 82 巻, 1 Hz 変換データ 30 巻), フロッピーディスクは計 170 枚である。

4.4. POS, 温度のモニター記録

POS 出力 4 成分 (上下動 2 台, 水平動 2 台) と上下動保温箱内温度のアナログモニターとしては, JARE-32 で持ち込んだハイブリッドレコーダー (NEC 三栄 HD2212) 記録を継続した。リアルタイム記録 (9 秒サンプリング) とメモリー記録 (432 秒サンプリング) とを併用し, 保温箱内温度と地震計ブームのポジション (POS) のドリフトによる推移の目安として使用した。第 32 次観測では LP (加速度) 出力 3 成分もハイブリッドレコーダーに記録していたが, 記録紙上で読みづらくなることから JARE-33 では POS のみをモニターした。観測上は特に問題なく年間を通し順調であった。POS のドリフト量と温度との相関についての議論は, 5.3 章に詳しく述べる。

STS には, ブームがドリフトした場合のゼロ点微調整を, ブームセンタリングモーター (MOT) 端子に 12 V 電圧を供給することで行える。このようなブームポジションのドリフト補正は, 地学棟地震記録室にある専用の装置 (JARE-31 で設置) を用い遠隔操作により随時行った。また, 7 月には UD (2) 用のゼロ点調整装置を 15 ボルト電源を基に自作して使用した。

4.5. LP デジタル収録

STS の LP (超長周期加速度) 出力は、20 秒より長い時間領域において地動の加速度に比例した信号が得られる。JARE-32 まではアナログによるモニターのみであったが、これのデジタル収録を 2 月下旬より開始した。地球潮汐や地球自由振動の解析に耐え得るデータを得るのが目的であり、超伝導重力計 (Superconducting Gravimeter: SCG) 出力との比較観測も可能である。AGNEW *et al.* (1986) による、地球自由振動の周波数領域における各地震計のダイナミックレベルとダイナミックレンジの比較によると、STS の LP 出力は SCG の MODE 信号には劣るものの SCG の TIDE 信号や IDA のラコスト重力計の信号と比較することが可能であり、自由振動のノーマルモードの解析には十分耐え得るものと期待される。

システム構成は、5 ch のアナログ信号 (4 台の LP 出力と UD (1) 用保温箱内の温度) を IEEE-488 制御によりスキャナー (ADVANTEST R7210) で切り分け、デジタルマルチメーター (ADVANTEST R6871E-DC) で AD 変換後 (20 ビット相当) にハードディスク (TEAC DS-80; 80 メガバイト) に保存した (図 5 の中枠)。3 秒サンプリングで 1 日 1 ファイル (約 600 キロバイト) を作成し、1 カ月ごとにストリーマ (CT600) にデータ転送した。なお、LP 出力にはアンチエイリアス用のローパスフィルターは使用していない。刻時は収録用パソコン (NEC PC-9801UV) の内部クロックを適宜修正することで対処した。LP デジタル収録も特に問題なく年間を通し順調であった。

4.6. 上下動比較観測用の収録システム

STS 上下動 2 台の比較観測のために、AD ボード (マイクロサイエンス ADM1698BPC; AD 分解能 16 ビット, 8 ch 使用可能) によるデジタル収録を行うとともに、2 ch ペンレコーダー (YOKOGAWA 3506) による連続モニター記録を得た (図 5 の下枠)。

デジタル収録は長時間ペンレコーダー (8D23H) や AD 変換器 (Q52K-1, CRSX1) と平行して行い、STS 四成分の BRB 出力を 20 Hz または 10 Hz にてサンプリングし連続収録した。20 Hz でサンプリングした場合 3150 秒でファイルが更新され、1 ファイル容量は 1024 キロバイトになる。ファイルは収録用パソコン (NEC PC-98NOTENS) の内蔵ハードディスク (20 メガバイト) に蓄え、地震や氷震イベントを含むデータファイルのみをフロッピーディスクに保存した。この AD ボードによるデジタル収録は 3 月上旬から 10 月上旬まで行い、収録したフロッピーディスクは計 174 枚に及んだ。また、AD ボードの空きチャンネルには HES 三成分を同時に入力した。図 7 には、このデジタル収録によって得られた HES 三成分の氷震波形例を示す。

刻時信号としては、タイムコードジェネレーター (エイクラ通信 T-2200A) からの IRIG-H 2 フォーマットのタイムコード、または NNSS に準拠した情報処理棟よりの IRIG-S タイムコードフォーマットを用いた (4.7 章を参照)。

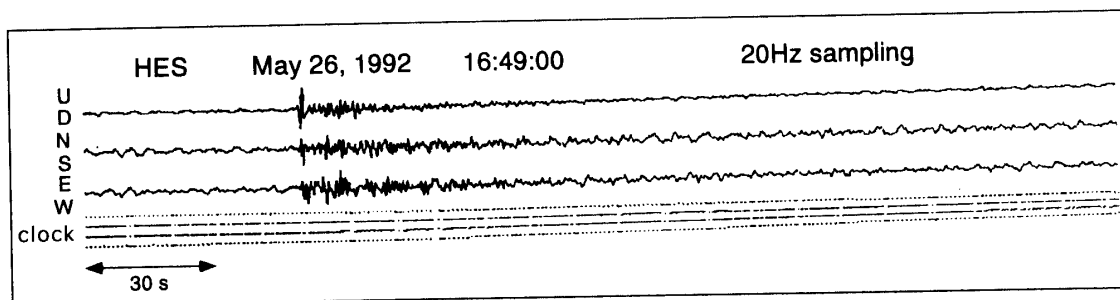


図 7 AD ボード収録により得られた HES 三成分の水震記録

Fig. 7. An example ice-shock recorded by an AD-board acquisition system (3-component HES seismograph). The sampling frequency was 20 Hz.

2ch ペンレコーダーは2月下旬から12月中旬まで、上下動2台のBRB出力を2cm/hの紙送りで記録した。紙送りが長時間3ch ペンレコーダー(8D23H)に比べて遅く、遠地震の際のモニターとして有効であった。なお、刻時信号は記録紙上には出力しなかった。

4.7. GPS による刻時信号取り込み

地学棟地震記録室における刻時信号は、従来より昭和基地内の情報処理棟で受信されている NNSS (Navy Navigation Satellite System) で更正される標準時計に同期していた。地震自動観測装置に組み込まれているタイムコードジェネレーター(エイクラ通信 TC-1000)の IRIG-B フォーマットによる変調出力からパルス発生装置(手製)を経て、長時間3ch ペンレコーダー(8D23H)やBRB デジタル収録用AD変換器(Q52K-1, CRSX1)にレファレンスパルスが取り込まれていた。しかし、トラブルが発生した場合に即時に対応出来なかったり、また情報処理棟と地学棟間の信号ケーブルが断線する可能性もあるので、地学棟で独自に刻時信号を取り込むシステムを導入する必要があった。そこで JARE-33 では、新規に GPS 受信機(日本無線 JLR-6000)を持ち込み、その受信用アンテナを地学棟の屋上に設置することで標準時(UTC)に同期した刻時信号を STS の各収録システムに取り込むことを試みた。図5の収録システムのブロックダイアグラムには、この GPS による刻時信号の取り込みの様子が示されている。

4.7.1. GPS とタイムコードジェネレーターについて

GPS (JLR-6000) から出力される 1PPS (1秒パルス) をタイミングコントローラー(エイクラ通信 T-2200A)に入力し、これに実装されているタイムコードジェネレーター機能により出力されるタイムコードを各システムに入力する。T-2200A が選択可能なタイムコードフォーマットとしては、IRIG-B, E, H2 の3種類があるが、このうち IRIG-H2 を選択してすべてのシステムに刻時信号を取り込んだ。このフォーマットはフレーム長1分、ビットレート 1PPS、変調周波数は 10Hz である。また、T-2200A に実装されているインターフェイス基板として、パラレル BCD 出力と RS-232 出力とがあり用途に応じてこれらを使い分けた。

4.7.2. 上下動比較観測システムへの入力

T-2200A の IRIG-H2 フォーマットで送られてきた変調出力を、AD ボードの一つのチャンネルに入力した。システム時刻としては収録用パソコン (NEC PC-9801NS) の内部時計を使用しており、適宜マニュアル操作にて更正した。

しかし、6月中旬に T-2200A が故障したため (下記に詳しく述べる)、7月上旬より長時間連続アナログ磁気記録 (TEAC R950L) に入力していた IRIG-S フォーマットを利用した。このタイムコードは情報処理棟から来ており NNSS に準拠したもので、呼び名は異なるものの IRIG-H2 と全く同様のフォーマットであるため代わりに使用した。

4.7.3. 長時間ペンレコーダー (8D23H) への入力

外部からの刻時信号による 8D23H の内部時計の更正は、パルス幅数 10ms, TTL レベル 5V 以下のオープンコレクタによる分、時マークを “DRIVE IN” 端子に入力する必要がある。このため分マークとしては、T-2200A のパラレル BCD 出力のうちフレーム同期パルスの最下位ビットにシュミットトリガー+シングルショットのデジタル IC を用いた回路を作成した。また時マークは、同じくパラレル BCD 出力のうち1時の桁の最下位ビットを用いて、シュミットトリガー+シングルショット+NAND ゲートのデジタル IC 回路を作成した。

4.7.4. BRB デジタル収録システムへの入力

BRB 収録システムの外部刻時信号による更正は、AD 変換器内部の刻時装置 (CRSX1) の “CLOCK REF” 端子に秒パルス (15VDC 以下、パルス幅 100 μ S 以上) を入力する必要がある (QUANTERRA INC., 1988)。このためパラレル BCD 出力のうち1秒の桁の最下位ビットにシュミットトリガー+シングルショット+NAND ゲートのデジタル IC を用いた回路を作成した。

なお 4.7.3 及び 4.7.4 の手製回路は 5V 電源を用いた 1 つの BOX (パルス発生装置) 内にあり、その基本構成を図 8 に示す。

JARE-33 における実際の 4.7.3 及び 4.7.4 の経過は以下のとおりであった。JLR-6000 は 2 月上旬のテスト段階より受信不能が続き、レファレンスパルスが得られない状態であった。4 月上旬に予備の JLR-6000 に切り替えた後、T-2200A とパルス発生装置 (手製) を経由しての 8D23H4 台と BRB 用 AD 変換器 (CRSX1) へのレファレンスパルスの取り込みを開始した。

しかし、6月中旬に T-2200A が突然動作を停止した。静電気ノイズが故障の原因と考えられたが、回復する見込みがなく 7 月上旬には以前と同じ NNSS による標準時計に戻した。このとき、NNSS 用のパルス発生装置 (シュミットトリガー+シングルショット) を新たに作成し、以前使用していたものを更新し刻時信号の取り込みを開始した。その後はトラブルもなく順調に経過した。必要のなくなった予備の JLR-6000 は、7 月上旬以後は NNSS との時刻比較用として常時モニターした。従って当初予定していた GPS による刻時信号の取り込

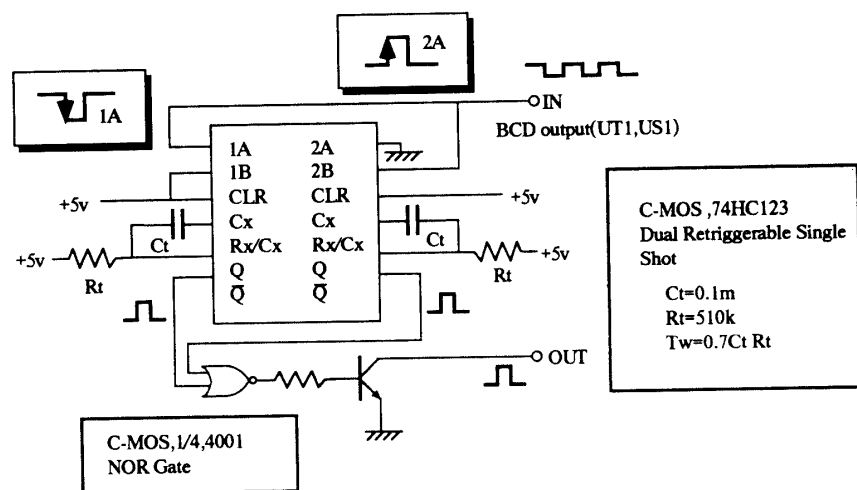


図 8 刻時信号用パルス発生回路の基本構成

Fig. 8. A schematic diagram of the circuit for generating clock reference pulses for the STS recording system.

みは、2 カ月余りの期間のみ実施されたことになる。

なお、情報処理棟より伝送されている NNSS による刻時信号はおおむね良好に動作したが、2 月中旬と 12 月下旬に情報処理棟内の DC アンプや 5 MHz 発信器等の故障で地学棟内のタイムコードジェネレーター／リーダー（エイクラ通信 TC-1000）の標準時刻が得られなくなるなど収録システムに影響した。

5. 観測結果

5.1. BRB 記録による地震波形例の紹介

ここでは、JARE-33 の観測期間（1992 年 2 月～1993 年 1 月）において記録された地震記録について、いくつかの BRB デジタル収録波形を示しその記録の特徴について述べる。

図 9a には、1992 年 6 月 28 日にカリフォルニア南部で発生した被害地震 ($M_s=7.4$, $M_b=6.2$) を、図 9b には 9 月 2 日にニカラグア沿岸で発生し大きな津波を伴った地震 ($M_s=7.0$, $M_b=5.3$) の昭和基地で得られた波形例をそれぞれ示す。また、図 9c には 12 月 12 日にフローレス島（インドネシア）近海で発生した地震 ($M_s=7.5$, $M_b=6.7$) の記録を示す。この地震は JARE-33 観測期間中においては最大の振幅を観測した。図 9c には顕著な表面波群の到来した様子がわかる。しかし、残念なことにカートリッジ MT 交換のためパソコンデータを転送中に地震が到来したため、初動到着直後の約 15 分間は欠測となっている。こういうこともあるので、BRB データの欠測のない連続収録が強く望まれる。

これらのほかにも、トルコ（3 月 13 日, $M_s=6.9$, $M_b=6.2$ ）、エジプト（10 月 12 日, $M_b=5.9$ ）、釧路沖（1993 年 1 月 15 日, $M_s=7.5$, $M_b=6.9$ ）などの被害地震はもれなく記録されている。驗震された震源分布からわかるように（5.2 章）、カリフォルニアやネバダでの爆破の

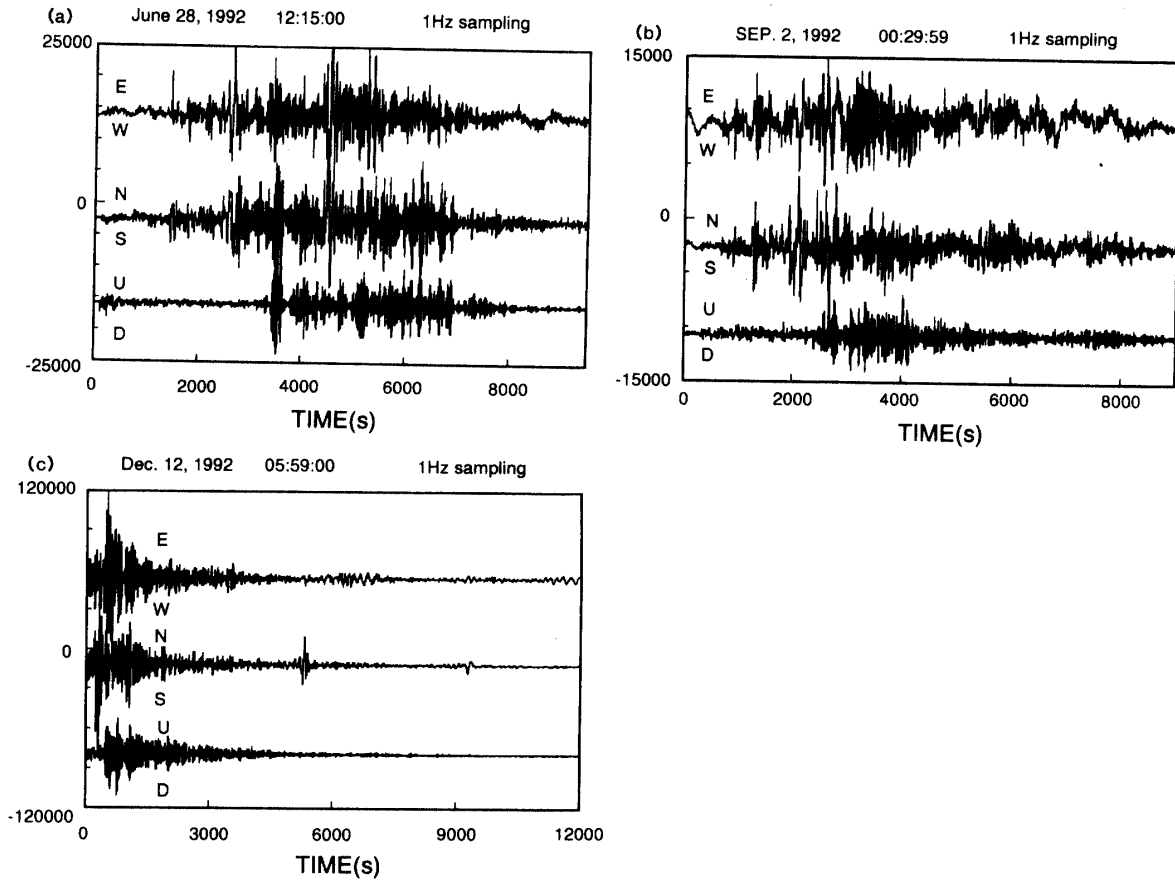


図 9 (a) カルフォルニア南部地震, (b) ニカラグア沿岸地震, (c) フローレス島 (インドネシア) 近海地震の STS デジタル記録

Fig. 9. Digital seismogram obtained from the three-component STS seismograph (20 s-mode for vertical component and 360 s-mode for horizontal components). The sampling frequency is 1 Hz. Hypocenter parameters of the earthquake are as follows; (a) origin time, 1157:34.1, June 28, 1992; location, 34.201°N , 116.436°W ; depth, 1 km, $M_b=7.4$, $M_s=7.4$, Southern California, (b) origin time, 0016:01.6, September 2, 1992; location, 11.742°N , 87.340°W ; depth 45 km, $M_b=5.3$, $M_s=7.0$, near coast of Nicaragua, (c) origin time, 0529:27.4, December 12, 1992; location, 8.512°S , 121.891°E ; depth 35 km, $M_b=6.7$, $M_s=7.5$, Flores Region, Indonesia.

PKP フェイズをはじめ, クリル諸島・カムチャツカ半島・アリューシャン列島, さらにスバルバル諸島における地震も記録されており, グローバルな地球内部構造の解明のためのデータが蓄積されている。

5.2. 駿震

こうして得られたイベントのうち, 昭和基地で読み取りモーソン基地に報告した総数は, 地震が延べ 402 個, 氷震が 1905 個であった。帰国後には国立極地研究所にて地震イベントに

ついでのみ、USGS が発行している震源速報 (Preliminary Determination of Epicenters; P.D.E.) と対応させて再検測が行われた。その結果、地震が同定されたものについては 680 個となり現地で読み取った個数より増加したが、震源が同定されなかったものが 180 個程度ある。680 個のなかには、ローカルなイベント (氷震を含む) は全く含まれておらず、それらを含めるとさらに読み取り個数は増加する。また、BRB デジタル収録により地震イベントとしてフロッピーディスクに保存した個数は 442 個であった。図 10 には、再検測された震源分布 (680 個) をメルカトル図法で示す。震源要素は上記の P.D.E. による。

験震は 8D23H モニター記録で行ったが、長周期地震記象の読み取りにとって紙送りが速く、イベントの判別やフェイズの読みとりが非常に困難である。上下動比較観測 (4.6 章に記述) で使用していた遅い紙送り速度 (6, または 2 cm/h) による記録が、長周期イベントやドリフトを考察するうえでより分かりやすいモニター記録といえる。

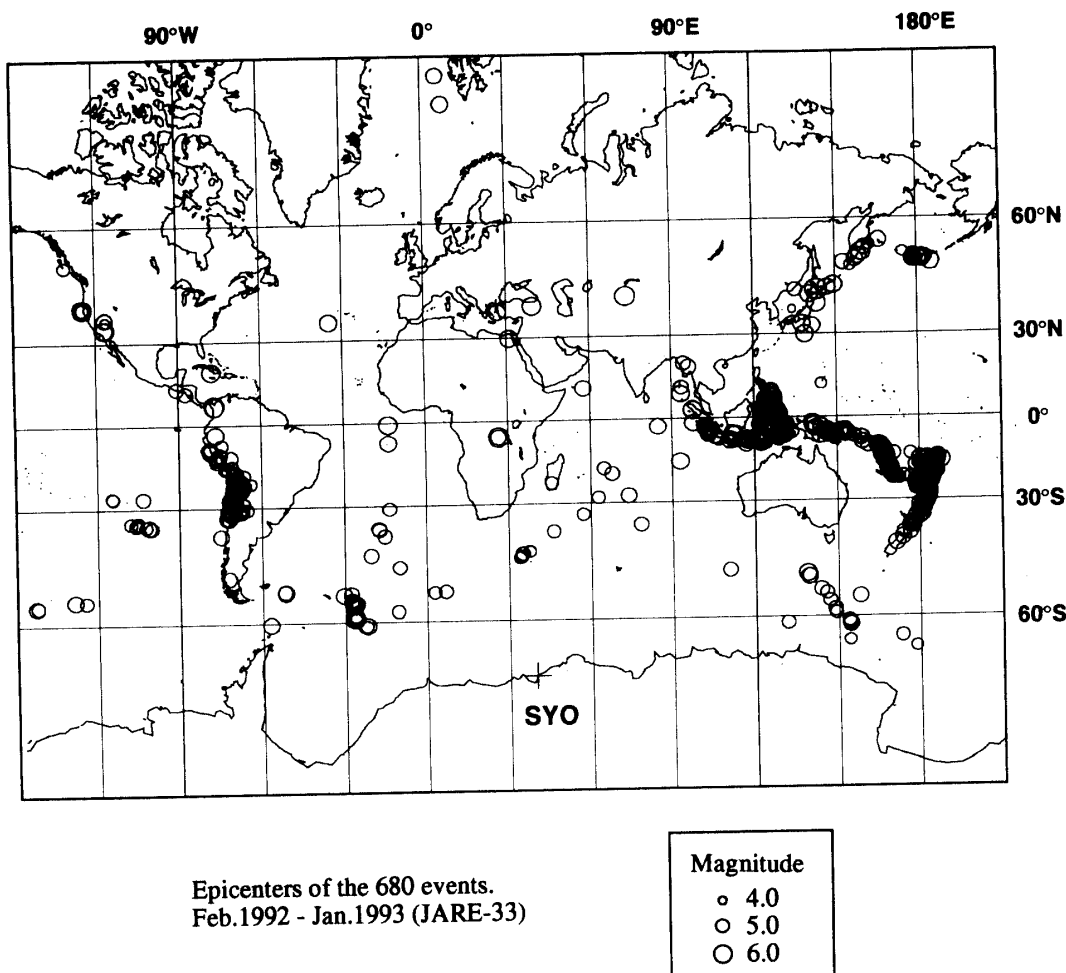


図 10 昭和基地で験震された地震の分布 (1992 年 2 月～1993 年 1 月)
 Fig. 10. The distribution of earthquakes whose waveforms were detected by the seismic recording system at Syowa Station (February 1992–January 1993). The plotted hypocenters are after Preliminary Determination of Epicenters by NEIS.

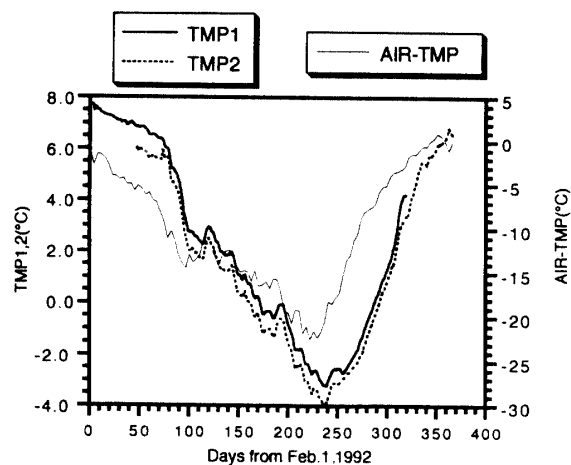
5.3. POS のドリフトと温度の相関

外部の温度変化に伴い STS のブームポジション (POS) が推移することが、すでに JARE-30~32 の観測期間に確認されている。JARE-33 においても前次隊と同様に POS の温度に対するドリフトを、特にハイブリッドレコーダー (RD2212) 記録により常時監視することが出来た (4.4 章に記述)。

図 11 には、昭和基地において気象庁が連続観測している気温の年変化 (AIR-TMP) と、上下動センサー保温箱内温度 (TMP1; UD (1), TMP2; UD (2)) との関係を示した。気温については、日平均値として 5 日分の移動平均をとった値を示してある。この理由は地震計室内のセンサー保温箱内温度が、外気温の短周期変動には影響されず数日分のローパスフィルターを受けていると考えられるからである。TMP2 の観測期間は 1992 年 4 月 13 日以降 1993 年 1 月 31 日まで、TMP1 は 1992 年 2 月 1 日から 1992 年 12 月 23 日の観測終了時までとなっている。図 11 より、保温箱内の温度の変動が外気温のそれに比べて 20 日余り遅れ傾向にあることがわかる。この傾向は前次隊の結果 (長坂ら, 1991; 山本, 1992) と調和している。

図 11 昭和基地気温と STS センサー保温箱内温度との関係

Fig. 11. Relation between air temperature (AIR-TMP, thick line) and the temperatures in 2 sets of boxes covering the STS-IV seismometers from February 1, 1992 to January 31, 1993. TMP1 (bold line) is for UD (1) and TMP2 (broken bold line) is for UD (2), respectively. Air temperature is after J.M.A.



次に、POS のドリフト量 (積算値) とセンサー保温箱内温度との相関を調べた。図 12a には、上下動センサー 2 台の POS (UD1, UD2) と TMP2 との関係を示した。図 11 より保温箱内温度として TMP1, 2 のいずれを POS の比較対象としても同様と考えられるので、簡略化のため TMP2 のみ表示した。2 台共に 10 月中旬以降は、シフトノイズの原因追求のために頻繁にセンサー部の交換やモード切り替えなどの設置作業を繰り返しているため、特に 12 月中旬以降のドリフト積算値については信頼性に欠ける (5.4 章を参照)。POS のドリフト量と温度変化との相関はそのセンスを含め明瞭である。定量的に詳しい議論は省くが、2 台の上下動共に気温に対する応答係数は $0.7 \sim 0.8 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ である。この値は、JARE-31 の結果 ($0.6 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ 程度; 長坂ら, 1991) と比較すると若干大きい値であるが、測定している温度が地震計室内と保温箱内との違いが原因であると考えられる。

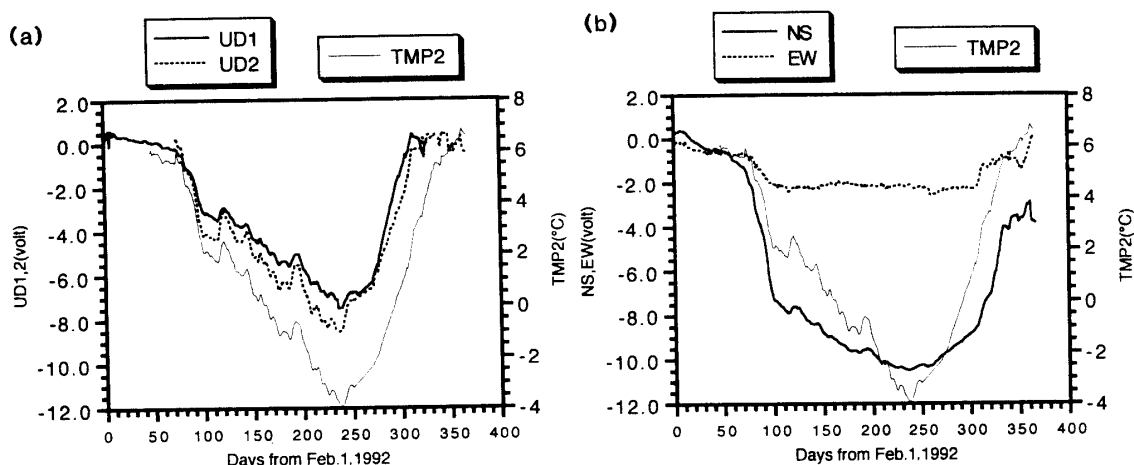


図 12 POS のドリフト量とセンサー保温箱内温度との関係. (a) 上下動, (b) 水平動

Fig. 12. Relation between cumulative POS outputs and the temperature in the covering box of the UD (2) seismometer (TMP2: thick line) from February 1, 1992 to January 31, 1993; (a) STS-1V seismometers (UD1: bold line and UD2: broken bold line), and (b) STS-1H seismometers (NS: bold line and EW: broken bold line).

図 12b には、水平動センサー 2 台の POS (NS, EW) と TMP2 との関係を示した。水平動センサー保温箱内の温度は直接には測定していないため、図 12a と同様に TMP2 を比較対象とした。水平動 2 台については、12 月以降の JARE-34 との引き継ぎ時を除いて調整は行っていない。図 12b から NS と EW の気温に対する応答係数が、それぞれ $1.0 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ 、 $0.2 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ 程度であることがわかる。この結果は JARE-31 の報告 (NS: $0.1 \sim 0.2 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$, EW: 相関が不明瞭なため求めている) と特に NS について差が大きい。正確な原因は不明であるが、上下動センサーと同様に測定している温度の対象の差と考えられる。なお、上下動も水平動も JARE-32 での結果とは調和的である (山本, 1992)。

以上のことから、年間の POS の推移は温度変化に密接に関係していることが確認された。温度変化以外にも特に気圧の変化が POS のドリフトに影響を与えることが考えられ、特に水平動成分において気圧変化が影響しているという報告がいくつかなされている (山田ら, 1989; 渋谷ら, 1990)。ラコストなどの重力計と異なり STS の場合、長周期のドリフトには気温の影響のほうがはるかに大きいと考えられるが、今後詳細かつ定量的な検討が必要であろう。

5.4. 上下動の比較観測によるノイズの原因追求

1990 年 4 月に JARE-30 により STS 三成分が昭和基地に設置されて以降、パルス状のノイズ (シフトノイズと呼ぶ) が UD (1) に頻繁に発生しており、STS 観測上の重大な問題点となっていた (村上・神沼, 1990; 長坂ら, 1991; 山本, 1992)。この現象は地震計室温の日変化

が 3°C を越えると起こりやすくなり、外気温が -20°C 以下の時期や、急激な温度変化があった場合に発生頻度が高くなることが確認されている。シフトノイズの起こる方向については、温度変化に伴って POS がドリフトする方向（5.3 章に記述）とは逆向きに発生する。すなわち、POS が低下する際にはシフトノイズは立ち上がり（上向き）に起こる。また、BRB のモードの違い（20 秒と 360 秒）により、シフトノイズの固有周期が異なる。

図 13 には、JARE-33 で観測されたシフトノイズの典型的な BRB デジタル記録例を示す。図 13a は UD (1) のみに発生した例で、図 13b は三成分共通に同時に発生した例である。UD (1) のみ 20 秒モードで水平動 2 台は 360 秒モードである。三成分共に発生する場合は非常にまれであり、過去の隊次では報告されていない。原因としてはおそらく、UD (1) のノイズ発

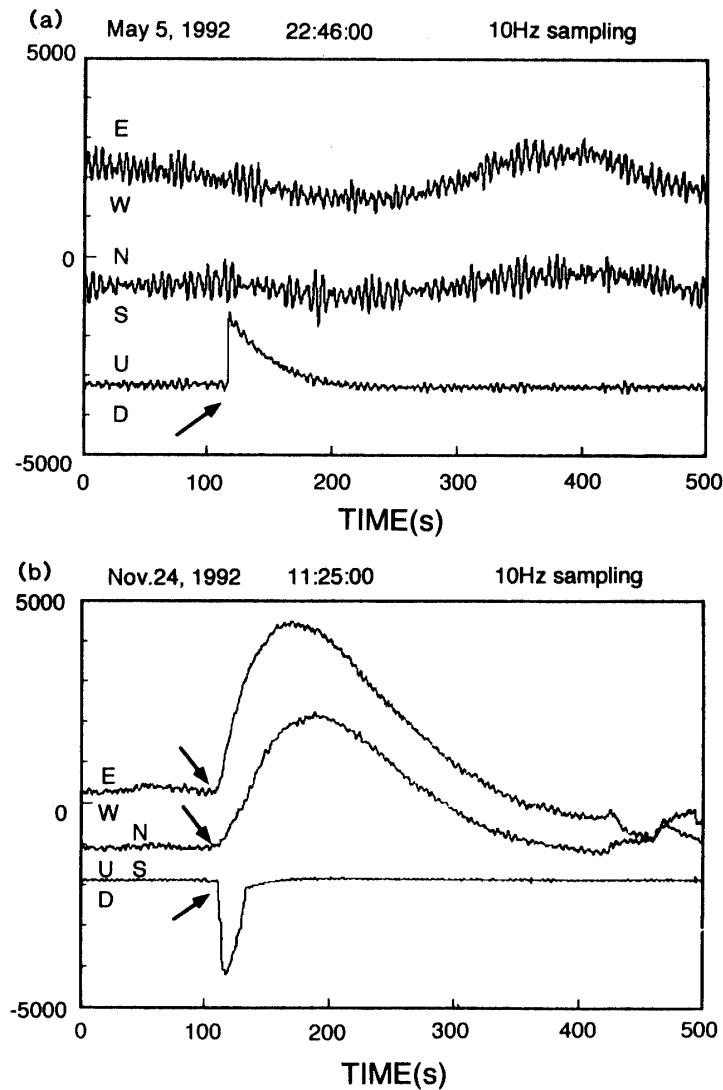


図 13 シフトノイズ例。(a) 上下動センサーのみ、(b) 三成分共に発生
 Fig. 13. An example of the shift-noise that occurred at the UD (1) seismometer (a) and simultaneously in all 3-components (b), 20 s-mode for vertical component and 360 s-mode for horizontal components, respectively.

生時の急激な電圧変化がアースラインを通じて他の二成分に影響を与えていると考えられる。なお、三成分共にノイズが発生した場合にも UD (2) には発生していない。また、感震器室入室時や地震・氷震などイベント到着時に発生しやすいことも確認されている。

シフトノイズの発生回数については、前次隊の報告と同様に特に粘土固定した上下動 (UD (1)) に多く現れた。また、上述のように三成分共に発生する場合以外に、二成分 (UD (1) と NS, または EW) に発生する場合があることが確認されている。一方、年間を通して UD (2) にはシフトノイズは全く確認されなかった。図 14 には、JARE-33 観測期間中の外気温 (AIR-TMP) と保温箱内温度 (TMP1), UD (1) のシフトノイズ発生回数 (棒表示) との関係を示した。一般的にノイズ発生回数は、JARE-30~32 での結果と同様に気温の急激な変化が起きた時期と対応している。ただし、ノイズ発生回数の総計は年次とともに減少している。過去の隊次の結果では、厳冬期を過ぎてわずかに気温が上昇する時期 (8~9 月; 図 14 では 180~240 日) に発生回数の最大値がみられたが、JARE-33 では 5 月上旬に多数発生した後、厳冬期以降には発生数の増加は見られたものの最大数には至らなかった。10 月以降に上下動 2 台の設置状況を頻繁に交換する作業を行っているため、単純に過去のデータと比較することは危険ではあるが、地震計のレベルの調整状態や保温状態、システム全体のアースラインの取り方などが複雑に絡み合った結果、全体としてはノイズの個数が減少していたと考えられる。

3 月から 10 月までは、UD (1) は前次隊の設置状態のままで、UD (2) については、ガラスプレートをもルタルで感震器台に固定して POS のドリフト量を考察するための連続観測を行った。

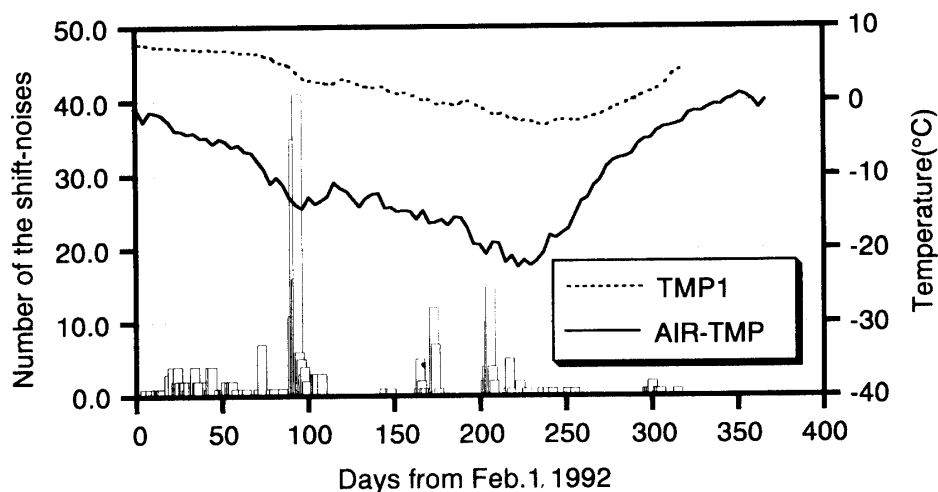


図 14 シフトノイズ発生回数と気温、およびセンサー保温箱内温度との関係
 Fig. 14. Relationship between the number of shift noises (bar) and air temperature (AIR-TMP, bold line), the temperature in the box covering the UD (1) seismometer (TMP1, broken bold line) from February 1, 1992 to January 31, 1993. Air temperature is after J.M.A.

10月中旬以降は、上下動2台のセンサー部とアンプ部、さらにガラスプレートの組み合わせを色々と替えることにより、UD (1) のシフトノイズ発生原因が何処にあるのかを調べた。その結果ガラスプレートの設置方法に問題はなく、モルタル固定した場合にも粘土固定の場合と同様に、UD (1) にシフトノイズが発生したがUD (2) には全く発生しないことが分かった。結局のところ、UD (1) 内部のフィードバックアンプ部内の低温下での劣化によるリレーの接触不良が原因か、またはセンサー部内のブームセンターリングモーターの駆動部分の劣化に原因があるのではないかと考えられた。

12月中旬には、上下動2台共に360秒モードに切り替えてみたが、前次隊と同様にUD (1) には周期300秒程度の自由振動現象が起こることが確認された。しかし、UD (2) には現れなかった。この自由振動現象は、アンプ内のダンピング用リレーの不良と考えられており、シフトノイズの発生と関係があると思われる。

しかしながらUD (2) については、3月に設置して以降感度が低い状態が続いた。これは11月中旬にフィードバック回路の出力にDCアンプを追加したことで、シグナルが増幅され見かけ上改善された。UD (2) の感度が低かった原因としては、フィードバック回路の出力抵抗が劣化し収録システムの入力インピーダンスが低い場合に信号が減衰し感度の低下となって現れることが考えられ、帰国後の調査で判明した。

結局のところUD (2) 用フィードバック回路内のダンピング用リレーを、JARE-34が持ち込んだ新品と交換することで、STS センサー設置の際のキャリブレーションが正常に行えるめどが付いた。そのため、UD (1) を12月下旬で観測を終了しJARE-33にて持ち帰った。1月中旬にJARE-34との引き継ぎを兼ねて再度センサー部の調整と真空引きを行い、最終的には三成分共に360秒モードで観測を行っている。

6. 定常観測への移行の検討

6.1. 収録システムの問題

HES, PELS の収録用にJARE-21 (1980年) で導入された地震自動観測装置は、設置以来10年以上が経過し以前より老朽化が指摘されていたが、JARE-33の3月に観測を中止せざるを得なかった(1章に記述)。システムチェックと地震のトリガーが重なった時のシステム暴走や、静電気や配線からのノイズの混入が原因でトリガー誤動作が多発したためである。長時間データレコーダー (TEAC R950L) による連続アナログ磁気記録も、在庫のMTのなくなった6月末で観測を終了した。これも、以前よりMTの回転速度のむらやテープ暴走が発生していた。

このように、地震自動観測装置とアナログ磁気記録を中止したため、現在の定常観測としては長時間連続モニター記録計 (8D23H) のみ稼働しているに過ぎない。STS によるデジタル収録 (BRB, 及び LP) は、すでに収録、編集作業ともにルーチン化しているものの、手作

業に依存する部分が多い。波形データを保存し走時の読み取り作業を行うだけであれば、現在の収録システムで十分に従来の定常観測システムの代わりとなりうる。さらに万全を期すには、大容量媒体を利用した欠測のない収録が望まれ、データ転送を自動化することでも必要であろう。また、波形処理や読み取り機能を持つ自動処理システムの導入で編集作業の無人化も今後の課題である。

6.2. 長周期地震計 (PELS) の代用の可能性

PELS 三成分にも、STS 同様に長周期地震計特有の温度変化によるドリフトが起こる。ポジションの変動量などを定量的には測定していないが、JARE-33 の観測期間中にも 5 月上旬と 8 月下旬に気温の急激な低下によるドリフトのため、UD と EW に感度低下が起こったのでレベルを調整した。また、6 月上旬には UD のみに感度低下が発生した。この二成分には温度変化にともなうドリフト補償回路が取り付けられているが、温度変化が急激であったためドリフト補正の制御が出来なくなったためと考えられる。12 月中旬と 1 月中旬には再度三成分の調整を行ったが、1 月中旬にはそれまで取り付けられていなかった NS 成分に温度補償回路を付加した。

また、まれではあるが 5.4 章で述べたようなシフトノイズが発生することが確認された。さらに、夏期間には地震計基台に接地したセンサーの足の部分に霜が凍結しゼロがずれるなど STS 以上に PELS による観測には問題点が残されている。

STS は PELS と比較してはるかに広い周波数帯域と広いダイナミックレンジを持つことから、PELS の代用として十分な機能を持つといえる。なお、STS が定常観測に移行した後においても、PELS 三成分による観測は STS との比較観測、あるいはバックアップの意味を兼ねて継続することが望ましいであろう。

6.3. 短周期地震計 (HES) の代用の可能性

HES 三成分は、PELS と異なり長周期成分のドリフトが少ないため年間を通して安定して記録が得られていた。JARE-33 では 5 月上旬と 12 月中旬、及び 1 月中旬に三成分の出力調整を実施したのみであった。なお、1 月の同じ時期に PELS 三成分を調整した際に、HES 三成分共に STS や PELS 同様のシフト状ノイズが発生した。調整の際に何らかのインパルス状電圧が混入したと考えられる。

現在の STS のシステムでは、微小地震や氷震等のエネルギーの小さいイベントに対してモニターによる検知率が極めて悪い。STS が HES の代用として使用可能であるかを確認するために、11 月下旬に BRB 出力に DC アンプ (gain を 100 倍に設定) と適当なアナログ・バンドパス・フィルターを組み合わせることで、SP 記録 (HES) に対応する出力が得られるかを確認した。BRB デジタル収録のアンチエイリアス用と同じ規格のローパス・フィルター

(カットオフ周波数 11.2 Hz) とハイパス・フィルター (カットオフ周波数 0.56 Hz) とを組み合わせてバンドパス特性を持たせた. 図 15 にはそのバンドパス・フィルターの振幅特性曲線を, また図 16a, b には, この試みによって 8D23H に記録された氷震波形例を示した. HES の上下動 (図 16a の上) と STSUD (2) (図 16b の上) とをただちに比較できるが, 記録紙上

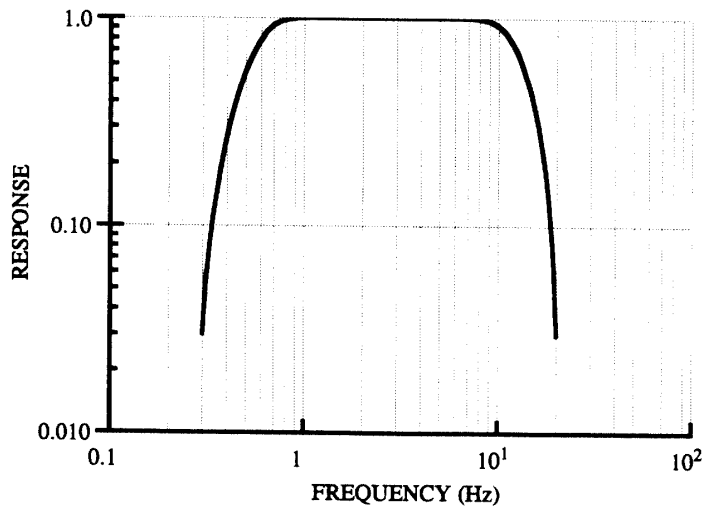


図 15 バンドパスフィルターの特性

Fig. 15. Amplitude response of band-pass analogue filter for velocity output (BRB) of STS-1 (UD (2)) seismometer.

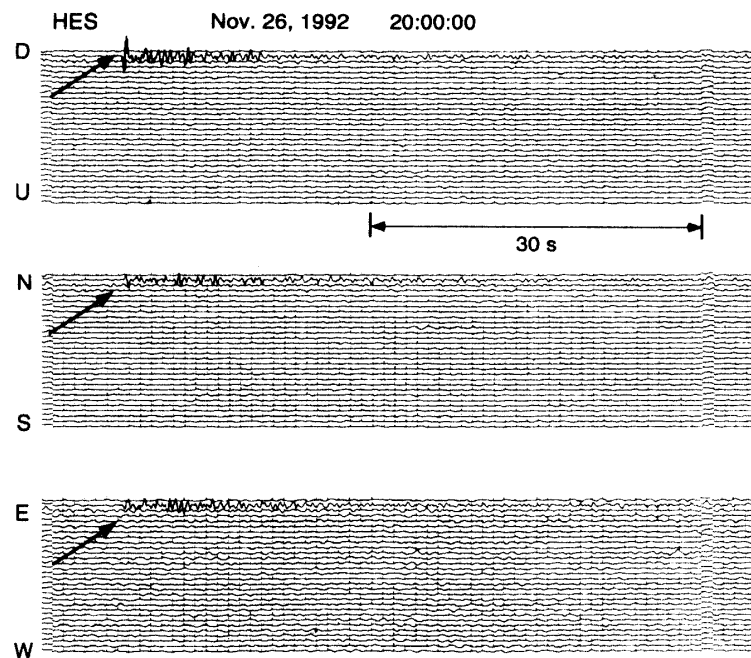


図 16a HES で得られた三成分波形例 (8D23 記録)

Fig. 16a. Monitor-recorded 3-component seismogram with HES. Hypocenter parameters of the earthquake are as follows: origin time, 1949:23.1, November 26, 1992; location, 18.267°S, 178.520°S; depth, 656 km, $M_b=5.2$, Fiji Islands. Note that the recording polarity of the vertical component is inverted.

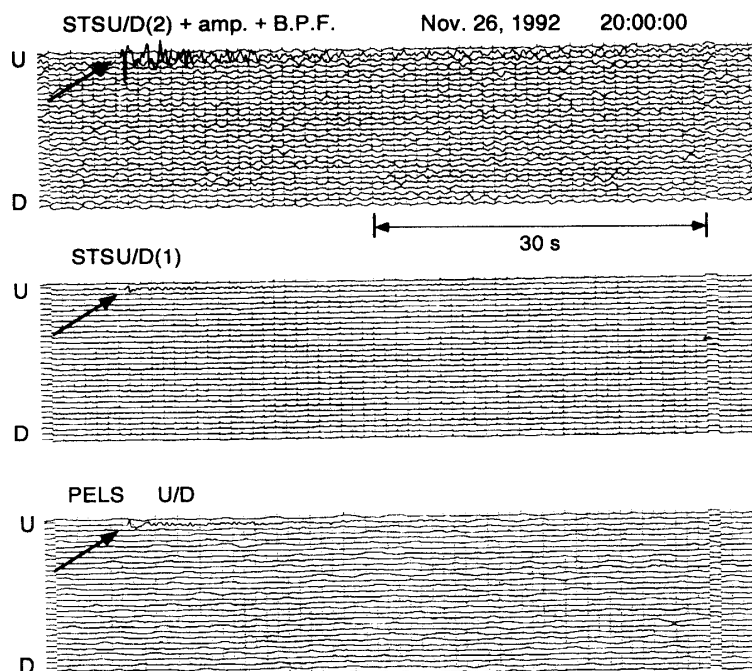


図 16b STS, PELS で得られた波形例 (8D23 記録)

Fig. 16b. Monitor-recorded seismograms with STS-1V (UD (2) for the upper trace, UD (1) for the middle trace, 20s-mode) and with the vertical component of PELS (lower trace). Output from UD (2) is amplified 100 times and band-pass-filtered for comparison with the HES seismograph. Hypocenter parameters are the same in Fig. 16a.

のセンスが逆であることに注意されたい。

この記録例から判断するかぎり、適当なアンプとアナログ・フィルターを用いて短周期領域の感度を高めることで、STS が PELS のみならず HES の代用としても用いることが可能なのことがわかった。しかしながら、元来 STS は長周期の地震をとらえることを目的としているので、あえて HES の代用として短周期側で用いる必要はなく、HES を STS と共に平行観測し微小地震や氷震などの読み取り用に使用すれば良いと思われる。

6.4. 地震計の設置状況と地震計室

昭和基地にある現在の地震計室は、すでに 3 章で詳述したように、基盤岩上に位置し地震観測には良好な地点である。しかし、JARE-11 で現在の場所に移設されて以来、以下に述べるような老朽化に伴う様々な問題が生じている。

12 月から 2 月にかけての夏期間の気温がプラスになる時期には、積雪や地下凍土の融氷水による浸水のため、地震計室内の地震計基台の側溝等に凍結が生じる。ブリザード後に著しく浸水し、特に STS を設置している長周期室では多量の水取りと排水を行う必要がある。浸水によりセンサー部までも水没する危険性が考えられたので、夏期間はほとんど毎日地震計

室への見回りを行う必要があった。また、浸水を軽減するために 11 月下旬より地震計室入口周辺の除雪と地震計室上への砂撒きを行う必要もあった。

地震計室内外の状態も年々悪化している。内壁に吹き付けたアスベストが浸水と凍結によりはがれ落ちた箇所もあれば、地震計基台が積年の凍結作用により風化してひび割れたり崩れたりしている箇所もある。さらに、地震計室の入り口がすり鉢状になっているため、風上側に位置しているのにもかかわらずドリフトがつきやすい。そのため、緊急の場合にすみやかに入室できるように、冬季には見回りを行うごとに入口周辺の除雪の必要があった。JARE-33 では、入口にオーニングシートによる覆いをすることで地震計室内への雪の侵入を防いだ。これにより、かなりの効果があり除雪の手間が軽減された。また 4 月中旬に前室に消火器と無線機を取り付けたが、入室時にブリザードに見舞われた際や火災等の事故に対する防災対策は十分とはいえない。さらに、11 月下旬の除雪の際には、STS テスト観測用に使用していた 6 芯信号ケーブルがブルドーザーにより誤って切断されるという事故が発生した。このときは、早急に対処して別のケーブルの空きチャンネルに繋ぎ替え大事には至らなかった。JARE-32 においても地震計室の電源ケーブルが切断されている。地震計室が蜂の巣山の北斜面に位置するため、地学棟からのケーブル類がすべて幹線道路を渡っているのが原因である。場所を移転するなどの対策が必要であろう。

上記で述べたように感震器室はかなり老朽化しており、特に浸水と除雪の対策と扉周辺の改修が望まれる。今後はさらに新地震計室への移設を検討する時期といえる。

7. ま と め

本論文では、南極・昭和基地における STS による広帯域高感度広ダイナミックレンジ地震観測の経過ならびに問題点について報告した。上下動センサーが交換され、シフトノイズの問題についてはかなりの部分が解決した。収録システムも追加や改善が試みられ、連続収録のデータ吸い上げ時での欠測や編集・読み取り作業の半自動化によるルーチンワークにめどがつけば、定常観測への移行上の問題はほぼ解決すると言える。今後は、日本へのデータ転送をハード・ソフト、および通信体制の面から本格的に整える時期といえる。

昭和基地における STS 地震観測により、過去 3 年間に渡り良質なデジタルデータが蓄えられている。来年次以後も継続して地震観測が行われ、さらにデータの向上と蓄積が期待される。今後は高ダイナミックレンジのデジタル波形データを利用して、グローバルな地球内部構造や震源過程の研究が行われることが大いに期待される。

謝 辞

この報告をまとめるにあたり、国内での準備以来多くの方々より様々な助言やご指導をいただきました。ここに厚くお礼申し上げます。特に名古屋大学理学部の山田功夫氏、気象庁

地震観測所の小林昭夫氏, 三上直也氏, アムコ株式会社の菅沼一代氏らには STS 設置の方法について有意義な助言をいただきました. JARE-30 地球物理定常隊員である村上寛史氏には, 国内での準備期間中に STS 設置についてご指導いただきました. また村上氏と長坂健一氏 (JARE-31 地球物理定常隊員), 及び山本正人氏 (JARE-32 地球物理定常隊員) には, 昭和基地の状況その他多くの助言をいただき, また議論をしていただきました. 国立極地研究所の渋谷和雄氏には, 準備段階および越冬期間を通して様々なご助力と助言をいただきました. さらに京都大学防災研究所都市施設耐震センターの赤松純平氏, 同地震予知研究センターの伊藤潔氏, 梅田康弘氏, 渋谷拓郎氏, 片尾浩氏, 安藤雅孝氏, 渡辺晃氏からは有益な助言をいただき, また議論をしていただきました.

なお, 越冬期間中は福地光男第 33 次観測隊長をはじめ隊員の方々にご協力をいただきあらためてお礼を申し上げます. また, 気象庁からは昭和基地の気象データを快く提供していただきました. また査読者の方をはじめ多くの方々の注意深い指摘のおかげで文章の改善がなされたことを付記し, ここに厚くお礼を申し上げます.

文 献

- AGNEW, D. C., BERGER, J., FARRELL, W. E., GILBERT, J. F., MASTERS, G. and MILLER, D. (1986): Project IDA: A decade in review. *EOS; Trans.*, **67**, 203–212.
- 神沼克伊 (1992): 南極の地震観測網. 第 12 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 19.
- 神沼克伊・江頭庸夫・吉田光雄 (1968): 昭和基地の地震観測. 南極資料, **33**, 65–70.
- 黒磯章夫 (1990): IRIS システムの紹介. 地震火山技術通信, **67**, 43–69.
- MELONI, A., DE SANTIS, A., MORELLI, A., PALANGIO, P., ROMEO, G., BOZZO, E. and CANEVA, G. (1991): The Geophysical Observatory at Terra Nova Bay. Sixth International Symposium on Antarctic Earth Sciences, Tokyo, Natl Inst, Polar Res., 404.
- 村上寛史・神沼克伊 (1990): 南極昭和基地における STS 地震計による広帯域地震観測. 第 11 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 36.
- 長坂健一・神沼克伊・渋谷和雄 (1991): 南極・昭和基地での超高性能地震計による観測. 南極資料, **35**, 335–354.
- QUANTERRA, INC. (1988): CCU3/VBB Integration Guide: CRSX1/Q52K Version Manual.
- 佐藤忠弘・渋谷和雄・岡野憲太・神沼克伊・大江昌嗣 (1992): 南極昭和基地における超伝導重力計による地球潮汐・地球自由振動の観測計画. 第 12 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 17.
- 渋谷和雄 (1986): 地震活動. 南極の科学, 5. 地学, 国立極地研究所編. 東京, 古今書院, 274–285.
- 渋谷拓郎・尾池和夫・平原和朗・西上欽也・和田博夫・中尾節郎・平野憲雄 (1990): 超高性能地震計 (STS) による地震観測-観測システムと地震波形例の紹介-. 京都大学防災研究所年報, **33(B-1)**, 1–18.
- STRECKEISEN, G. and MESSGERAETE, A. G. (1987): Very-broad-band Feedback Seismometers STS-1V/VBB and STS-1H/VBB Manual. 34–35.
- WIELANDT, E. and STRECKEISEN, G. (1982): The leaf-spring seismometer, design and performance. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **72**, 2349–2367.
- 山田功夫・深尾良夫・石原 靖・青木治三 (1989): STS 地震計による広帯域・広ダイナミックレンジ地震観測. 地震 2, **42**, 21–33.
- 山本正人 (1992): STS センサーの保温箱内の温度変化, 外気温変化による不安定性. 第 12 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 18.

(1993 年 8 月 17 日受付; 1993 年 9 月 22 日改訂稿受理)